

# 분산전원 계통 연계시 접속용량 한계 설정을 위한 분석

백 승 목 / 공주대학교 전기전자제어공학부 조교수  
박 정 옥 / 연세대학교 전기전자공학부 교수

## 1. 머리말

국내 신재생에너지원의 정책 확산과 함께 분산전원 기술 개발로 발전가가 점차 그리드 패리티(grid parity)에 가까워지면서 분산전원의 계통연계에 대한 요구가 증가하고 있다. 또한, 분산전원의 비중을 12.6%로 확충하는 제 6차 수급 계획과 원자력 발전을 기피하는 사회적인 분위기 역시 분산전원 증가를 가속화시키고 있다. 한편, 풍력이나 태양광발전의 경우, 입지적 조건이 제한적이므로 계통연계에 대한 요구가 일부지역에 국한되고 있으며, 이에 따라 특정 변전소에 많은 분산전원이 연계되어야 하는 상황도 발생하고 있다. 그러나 현재까지 국내에서는 국내계통 현황을 반영하여 분산전원의 최적연계용량 산정에 대한 연구가 수행되지 않아 변전소 단위로 그 한계량을 일괄 적용하고 있다.

현행 분산전원 연계기준 [1]을 보면, 특고압 계통의 접속 제한규정은 표 1에서 제시된 것처럼 154kV 변전소 기준 Bank당 20MW, 변전소당 40MW의 분산전원 접속 한계용량을 사용하고 있다. 분산전원의 계통연계 운전 중 특고압이 과반수 이상(그림 1 참조)을 차지하고 점점 더 늘어나고 있는 상황에서 안

표 1 발전소 계통연계기준(송·배전용 전기설비 이용기준 (2))

발전소 최대송전용량	연계전압	비고
20MW 이하	22.9kV	1) 계통여건상 문제점이 없고, 고객이 직접 송전망에 접속할 경우에 한함 2) 고객이 희망하고 계통여건상 문제점이 없을 경우에는 154kV 적용가능
20MW 초과 ~500MW 이하	154kV	1) 연계되는 변전소 배전용변압기 1뱅크당 접속하는 총 발전기 용량이 20MW 이하이고, 계통여건상 문제점이 없으며, 고객이 직접송전망에 접속할 경우 40MW까지 22.9kV 적용가능 2) 고객이 희망하고 계통여건상 문제점이 없을 경우에는 345kV 적용가능
500MW 초과 ~1,000MW 이하	345kV 또는 154kV	-
1,000MW 초과	345kV 이상	-



그림 1 신재생에너지 계통연계 운전현황(대수력 제외)

정적인 계통 운영을 위하여 합리적인 기술 근거를 바탕으로 한 접속용량 산정이 요구되며 접속 한계용량 산정 시 적합한 기술성 평가 기준이 필요한 시점이다.



한편, 신재생에너지 기반 분산전원의 경우 위치 및 시간대별로 출력을 예측하기가 어렵고 전압변동 및 보호협조와 관련하여 계통 신뢰도 문제가 발생할 가능성이 있다. 또한, 선로, 부하, 변압기, 여타 보호 장치 등의 계통 환경에 따른 분산전원이 계통에 미치는 영향 분석이 필요하다. 이와 함께 배전계통의 운영 측면도 고려해야 한다. 특고압 연계시 배전선로 영향에 대한 기술 분석은 “분산전원 배전계통 연계업무 기술기준”에서 이미 합리적인 검토사항을 제시하였으므로, 본고에서는 배전계통의 상위의 변전소 측면에 미치는 영향 분석을 주로 다루고자 한다. 즉, 분산전원 계통 연계시 국내 계통상황에 합리적인 접속한계량 설정을 위한 분석 방법을 소개하고, 국내 계통의 상황 및 운영여건을 고려하여 계통상황 분석, 변전소 보호협조 분석, 전압변동을 및 고조파 분석 등을 통해 접속한계량 설정 방법을 기술한다.

## 2. 국내 변전소 운영의 특징

본고에서는 국내의 배전계통 환경을 분석한 후 국내 계통에 적합한 접속용량 한계설정 분석에 대해 기술하고자 한다. 관련하여 “분산전원 배전계통 연계 기술기준”이 2012년 6월에 개정되었으며, 해당 규정은 분산전원 연계시 22.9kV 모선 및 그 하위의 배전계통에서 발생할 수 있는 문제를 염두에 두고 기술기준을 제정하였고, 접속용량 한계설정에 관한 내용은 다루지 않고 있다. 대신, “송·배전용전기설비 이용규정”에 접속 한계용량에

표 2 전국 변전소 및 내부 설치 변압기 현황

Bank 수	변전소(개소)	비율(%)
1	3	0,5
2	151	22,7
3	224	33,6
4	223	33,5
5	35	5,3
6	5	0,8
기타	25	3,8
총합	666	100

대한 내용이 제시되어 있으나, 분산전원의 연계가 변전소 단위에 미치는 영향에 대한 분석에 대해서는 언급되어 있지 않다.

분산전원 연계용량 설정에 있어 국내 변전소 현황, 주 변압기의 사양 및 운영방식을 등의 분석이 우선적으로 필요하다. 현재 전국적으로 650 개소 이상의 154kV 변전소가 설치되어 있다. 표 2를 보면 Bank 수가 2, 3, 4개인 변전소가 대부분을 차지한다. 그 중에서도 3, 4개 Bank를 가진 변전소의 비율이 각각 33.6%, 33.5%로 가장 많다. 이중 30/40MVA 변압기를 사용하는 변전소는 총 13 개소이며, 대부분의 경우 45/60MVA의 변압기를 사용하는 변전소로 구성되어 있다.

변압기와 변전소 단위의 접속용량 한계설정 기준을 제시하려면 현행 변전소의 운용 형태도 고려해야 한다 [3]. 특히, 변압기 유지보수를 위한 휴전<sup>1)</sup> 및 고장<sup>2)</sup> 등에 따라 변압기 한 대가 두 대에 연계된 배전계통의 전원공급을 담당하는 경우가 빈번하므로 접속용량 한계설정에 있어서 최소한 한 대의 변압기는 운영상 여유분으로 가

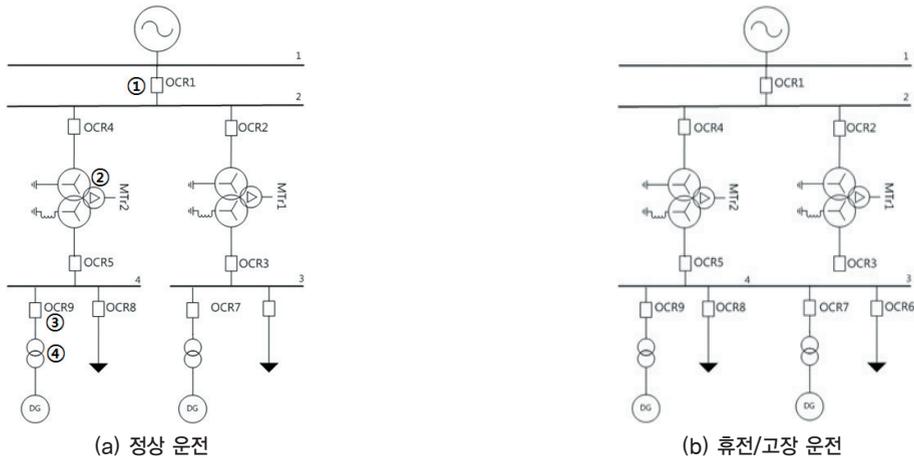


그림 2 접속용량 한계설정을 위한 계통구성

정해야 변압기 과부하를 미연에 방지할 수 있다. 따라서 국내 계통의 운영상 특징을 포함하여 모의를 수행하기 위해서는 그림 2와 같이 2뱅크 시스템을 기준으로 정할 수 있으며, 정상운전 및 휴전/고장 운전에 대한 계통을 구현하고 분산전원 연계에 대한 영향을 검토해야 한다.

국내상황에 맞는 분산전원 한계용량 설정을 위해 그림 2와 같이 구성한 계통을 구성한 계통에 아래 제시한 사항들을 고려하여 계통 파라미터를 적용해야 한다. 즉, 그림 2에 제시된 번호에 해당하는 파라미터 값들을 국내 계통 상황에 맞게 선정해야 하며, 국내 전국 변전소를 대상으로 취득한 데이터를 이용하여 가장 적합한 데이터를 선별하여 접속용량 한계 설정 분석에 적용해야 한다.

- ① 154kV 등가 임피던스 (Base: 100MVA, 154kV)
- ② 변압기 임피던스 (Base: 100MVA)
- ③ 전용 선로 임피던스 (Base: 100MVA, 22.9kV)
- ④ DG 변압기 임피던스 (Base: 100MVA)

### 3. 접속용량 설정을 위한 고려요소

본 절에서는 접속용량 한계설정을 위해 그림 2에서 구현된 대상계통을 이용하여 분석할 요소들을 제시하고자 한다. 2절에서 설명한 것과 같이 변전소의 주변압기는 휴전/고장 등에 대해 상시 대비가 되어야 하며, 이와 같은 상황을 고려하여 분석에 적용해야 한다. 우선적으로 고려해야 할 사항은 변전소의 보호협조이다. 변전소에는 발전기 보호를 위해 다양한 보호설비가 설치되어 있으며, 고장에 따라 열병합발전기, 태양광발전기, 풍력발전기 등 다양한 분산전원에 의한 고장전류를 분석하기 위해 각 분산전원 모델을 적용하여 고장전류 특성을 분석해야 한다. 또한, 접속용량 설정을 위해 변전소 인근 특 고압 모선의 전압변동률, 차단용량, 전력품질 등과 같이 계통 안정성 관리에 필요한 여러 요소들의 적합성을 검토해야 한다. 참고로 본고에서는 분산전원의 개별특성

및 상세모델에 관한 언급을 제외하였지만, 아래 각 항목에 대해 분산전원별 영향을 분석해야 한다.

#### 〈최대 연계용량 산정 고려 요소〉

- 보호협조
- 고장전류에 따른 차단용량
- 전압변동률
- 전력품질

#### 가. 154kV 변전소 보호시스템

접속용량 한계 설정에 있어서 분산전원 연계량 증가 시 기존 시스템의 보호 협조를 붕괴시키지 않아야 한다는 것은 주요한 기준이 될 수 있다. 보호 협조가 붕괴되어 사고시 계통 내 보호 설비 부동작 또는 오동작으로 인하여 기존보다 더욱 큰 계통 피해를 불러일으키거나 운영가능한 선로를 차단하여 막대한 손실을 초래할 수 있으며, 사고가 없다 하더라도 막대한 장비교체 비용을 유발할 가능성도 있다. 따라서 배전계통 사고시, 기존에 계통 운영자가 의도했던 보호동작이 일어나는지에 대한 분석이 필요하며 그에 앞서 사고시 분산전원에 의하여 발생하는 고장전류와 차단기, 계전기 등의 보호설비 및 변압기 등의 동작을 파악해야 한다 [4].

또한, 변전소 내에는 다양한 보호기기가 설치되어 있다. 그림 3은 변전소 내에 설치된 보호설비들을 나타내며, 표 3은 설치된 보호설비들의 목적을 나타내고 있다. 이 중, 51P, 51S(과전류계전기,OCR)와 51SN(지락 과전류계전기,OCGR)이 분산전원 증가에 따라 검토되어야 하는 주요 계전기이며, 분산전원 연계시 정상동작 여부를 분석해야 한다. 51P는 변압기 1차 측에 51S는 변압기 2차 측에 설치되어 변압기부터 그 아랫단 사고시 송전선로에서 유입되는 고장전류로부터 변전소와 하위에 배속된 배전계통을 보호하고, 51SN의 경우 배전계통의 지락 사고시 변압기 2차측 접지선에서 흘러나오는 고장전류로부터 변압기를 보호하기 위해 사용된다.

1) 휴전 : 변전소 내에서 사고예방 및 기타 사유로 인한 작업으로 인하여 한 개 이상의 변압기의 운전을 정지하고 해당 변압기에 연결된 선로의 전력을 인근 변압기에서 맡아서 운전하는 경우를 휴전이라 한다.  
 2) 고장 : 운용중인 변압기가 여러 이유로 인해 고장이 발생했을 경우, 휴전시와 마찬가지로 인근 변압기에서 해당 변압기에 연결된 부하를 맡아 운용하게 된다.

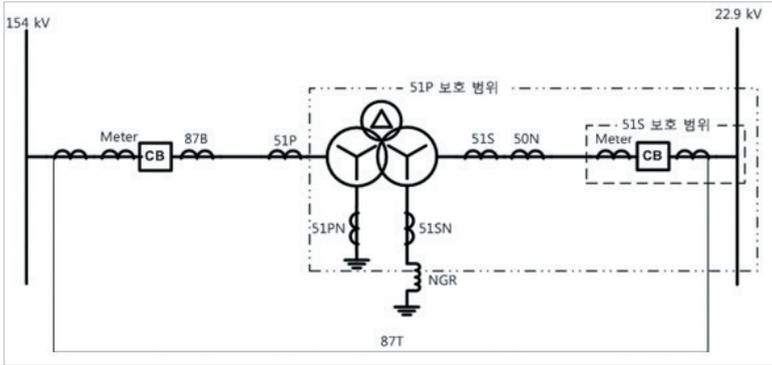


그림 3 154kV 변전소 내 보호 설비 구조

표 3 변전소에 설치된 보호기기와 그 역할

계전기 종류	역할
87T	변압기 보호
87B	154kV 모선 보호
51P	변압기부터 22.9kV 모선 인출 차단기까지 보호
51S	변압기 2차측 차단기부터 22.9kV 모선 인출 차단기까지 보호
51PN	경보 운전용
51SN	변압기 2차측 내부 권선부터 22.9kV 모선 인출 차단기까지 보호

나. 분산전원 연계시 보호시스템 동작분석

1) 변전소 내부 51P, 51S 보호동작 분석

154kV 변전소에 설치된 보호기기들은 단방향 조류 상황 가정 하에 설치된 계전기들이며, 이들의 목적은 주로 송전선로로부터 유입되는 고장전류로부터 변압기와 변전소 2차측 모선 및 하위 계통을 보호하거나 접지선으로부터 유입되는 지락 전류로부터 변전소 내 변압기들을 보호하기 위한 것이다. 그러나 변전소 내에 역조류가 발생하게 된다면, 보호 설비의 오동작 및 부동작 가능성이 발생한다. 일례로 변전소 내 설치된 OCR인 51P, 51S의 경우 단방향 계전기를 사용하기 때문에 역조류가 Pick-up 전류값을 넘게 된다면 변전소 내부의 차단기가 동작하여 해당 Bank 아래의 계통에는 정전이나 독립운전이 일어난다. 따라서 최대 연계용량 산정시 변전소 내부 주요 보호설비들이 오동작이나 부동작하는 상황을 구체화하여 설정하고 기존의 보호협조 유지 여부를 살펴보는 것도 검토사항이 될 수 있다.

2) 변전소 내부 51SN 보호동작 분석

최대 연계용량 산정 시 OCGR의 오동작, 부동작 여부

도 연계용량을 판단하는데 중요한 요소가 될 수 있다. 배전계통 내 지락사고 발생시 설치된 변압기에 접지선을 타고 변압기 측으로 고장전류가 유입이 된다. 변전소의 변압기로 접지 전류가 유입이 된다면, 변압기 고장 가능성이 크므로 이를 미연에 방지하기 위하여 51SN을 이용한다. 충분한 크기의 고장전류가 유입이 된다면 의도한 시간 내에 OCGR을 동작시켜 해당 변압기를 보호할 수 있다. 그러나 분

산전원이 설치된 경우에는 이야기가 다르다. 보통 분산전원은 한전계통에 Y-Δ 변압기를 연결하며 해당 변압기 종은 사고시 중성선을 통하여 영상전류를 공급받는다. 배전계통 사고시 분류 효과가 발생하게 되어 분산전원 비연계시라면 주변압기 접지점 아래로 유입되었을 전류의 일부가 분산전원 연결 변압기의 접지점 아래로 향하게 되어 주변압기에 유입되는 지락고장전류 크기는 감소하게 된다. 이 경우, 51SN 동작시간이 기존에 의도된 동작시간인 60cycle보다 늦어지는 경우가 발생하며 최악의 경우, 시간 지연이 거리계전기의 Zone3 동작시간보다 늦어져 변전소 전체가 정전되는 상황이 벌어질 수도 있으므로 접속용량 한계설정에 중요한 요소가 될 수 있다.

3) 고장전류에 따른 차단 용량

특고압단에 설치된 차단기의 차단용량은 25kA이다. 배전선로에 흐르는 전류가 25kA를 넘어가게 되면 차단기의 고장 우려가 있으므로, 특고압 계통에 흐르는 전류량은 25kA가 넘지 않아야 한다. 사고시 차단용량이 25kA를 넘어서는지에 대한 확인도 필요하다.

다. 전압변동 및 전압품질 분석

전압변동을 관측에 있어서는 최악조건을 가정하여 최대 연계용량을 산정하는 것이 좋을 것이다. 실제 천재지변이나, 풍력단지 내에서 급작스런 풍속 변화, 여타 계통 혼잡으로 일어난 연계된 모든 발전기의 운전상태가 급작스럽게 변화하할 가능성이 있다. 계통 투입 시에는 보통 램프로 출력을 증가시키기 때문에 모든 분산전원을

표 4 순시 전압변동을 허용 기준

변동빈도	순시전압변동률
1시간에 2회 초과 10회 이하	3%
1일 4회 초과 1시간에 2회 이하	4%
1일에 4회 이하	5%

트립시키는 쪽이 보다 더 현실성 있는 최악조건이 될 것이다. 따라서 모든 연계 분산전원 트립시 특고압단의 전압변동을 관찰이 요구된다. 전력 품질의 경우 동기발전기는 고조파를 발생시키지 않고, 인버터나 유도기의 경우 전력품질 요건 자체가 까다롭고 해당 조건을 만족시키지 않으면 생산 및 배치가 될 수 없기 때문에 별 문제는 없을 것이나 여러 분산전원 변전소 2차측 특고압단에서 계통 전체에 설치된 여러 분산전원의 조류가 모이게 될 때의 전력품질을 확실히 보충할 수 없으므로 이에 대한 분석도 필요하다. 전압변동 및 고조파와 관련된 국내 규정은 아래와 같다.

○ 전압변동

- 특고압 계통의 순시 전압변동률은 표 4에 해당하는 기준을 만족해야 한다.
- 송전용 전기설비 접속 기준에서는 전력계통에 설비용량 20,000kW 이상의 신재생 발전기가 신규로 연계될 때에는 상시 전압변동 2% 이하, 순시전압 변동 2% 이하 기준을 만족해야 한다.(송전계통 기준)

○ 고조파

- 특고압 한전계통에 연계되는 분산전원은 연계용량에 관계없이 한전이 계통에 적용하고 있는 “배전계통 고조파 관리기준”에 준하는 허용기준을 초과하는 고조파 전류를 발생시켜서는 안된다. 특고압 연계에 대한 국내 허용 기준은 표 5와 같다.

본고에서 언급한 계통 상황 및 기술기준을 종합하여 최대용량산정에 필요한 검토사항들을 표 6에 정리하였다. 국내 대부분의 변전소 변압기는 45/60MW급이 설치되어 있으므로, 45/60MW급 변전소를 가정했을 때, Bank 당 30MW의 분산전원이 연결된 정상운전 상황과 한 Bank가 담당하던 배전계통이 절체되어 한 변압기가 총 60MW의 분산전원과 2개 Bank의 모든 부하를 담당하는 휴전상황을 기반으로 제시된 모든 사항을 검토할 필요가 있다. 또한, 각 항목에 대해서 분산전원 종류별 영향을 각각 검토해야한다. 검토 후 문제사항 발생 시 해당 문제가 발생하지 않는 연계용량을 찾아 해당 검토사항 측면에서의 최대 연계용량으로 결정한다. 검토사항으로써 기존 보호시스템을 유지할 수 있는 최대 연계용량 파악을 위하여 OCR의 경우에는 154kV 모선 단락사고 모의 후 OCR 측정전류가 Pick-up 전류값을 넘는지 확인하며, OCGR의 경우에는 22.9kV 모선 지락사고 시 거리계 전기보다 먼저 동작하는지 확인할 것이다. 전압변동률

표 5 분산전원 연계시 고조파 제한

3의 배수가 아닌 기수 고조파		3의 배수인 기수 고조파		우수 고조파	
차수 h	고조파전압(%)	차수 h	고조파전압(%)	차수 h	고조파전압(%)
5	3.8	3	3.1	2	1.3
7	3.1	9	0.9	4	0.6
11	2.2	21	0.2	6	0.3
13	1.9	>21	0.2	8	0.3
>17	$\{1.36 \times (17/h)\} - 0.16$			>8	$\{(0.15 \times (10/h)) + 0.15$

주) 종합 고조파 왜형률(THD): 배전계통에서 5%

표 6 최대 연계용량 산정을 위한 검토 사항

검토 기준	확인 사항	비고
보호협조	154kV 모선 단락사고시 변전소 OCR 동작 여부 확인 22.9kV 모선 지락사고시 변전소 내 OCGR과 송전선로 거리계전기와의 동작시간 비교	정상운전(Bank당 30MW 연계) / 휴전 운전(Bank당 60MW 연계) 시 확인 후 요건 만족하는 최대 연계용량 확인
전압변동률	모든 분산전원 트립시	
전력품질	분산전원 연계시 특고압단 조류 고조파 확인	
차단용량	최대 고장전류가 25kA를 넘는지 확인	



의 경우에는 분산전원을 트립시킨 후의 변전소 2차측 모선의 전압변화를 확인할 필요가 있다. 전력품질 역시 특고압단에 흐르는 조류가 고조파 기준을 만족시키는지 확인해야 한다. 이와 함께, 계통내 사고시 발생하는 고장 전류가 배전선로에 설치된 차단기의 차단용량을 초과하는지도 확인할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본고에서는 분산전원 계통연계시 접속용량 한계설정을 위한 분석에 대한 검토사항에 대해 소개하였다. 2012년 6월에 개정된 “분산전원 배전계통 연계 기술기준”과 기존 “송·배전용전기설비 이용규정”을 참조하여, 변전소를 포함한 변전소 주변의 계통안정성 확보를 위한 기술성 평가 방안을 제시하였고, 각 기술성 평가 항목 및 변전소 운영측면을 고려하여 변압기와 변전소에 접속이 가능한 분산전원 한계량을 설정하는 방안을 아래와 같이 소개하였다.

- 변전소 및 변압기 보호를 위한 기술 검토 기준 제시
  - 변전소 내에 송전단을 향한 역조류 발생시 사고 후 보호협조 검토
  - 전압변동을 검토를 통한 변전소 주변 계통 안정성 검토
  - 분산전원 연계로 인한 Bank 유입 전류의 품질저하 검토

국내계통의 특성을 분석하여 모의환경을 구축하는 내용과 실제계를 상세 모의하여 결과를 검증하는 부분에 대한 내용을 포함하지는 못하였지만, 본고에서 제시한 방안이 따라 분산전원의 접속용량 한계를 설정한다면, 분산전원 확대와 동시에 안정적인 계통 운영이 가능해질 것으로 사료된다. 또한, 향후 변전소 운영측면에서 배전계통 상시 감지시스템, 분산전원의 실시간 운영 및 감지시스템, 변압기 휴전/고장과 같은 상황에서 분산전원의 출력량 감발운전 등이 가능하도록 인프라 및 제도적 장치 등이 마련된다면 연계 가능한 용량은 본고에서 제시한 방법으로 설정된 용량보다 더욱 늘어날 수 있다고 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] “분산형전원 배전계통 연계 기술기준”, 한국전력공사, 2012.06.
- [2] “송·배전용전기설비 이용규정”, 한국전력공사, 2013.01.
- [3] “전력설비 중부하 운전시 관리방안 수립”, 한국전력공사 송변전운영처, 2012.07.
- [4] 계통보호업무 가이드북, 한국전력공사, 2010.04.